

# Giải pháp thiết kế đoạn chuyển tiếp giữa nền đất và công trình nhân tạo trong đường sắt tốc độ cao

Design solutions for transition zones between earthworks and structures in high-speed railways

> **KS NGUYỄN MẠNH TIẾN<sup>1,\*</sup>, TS LÊ CÔNG THÀNH<sup>1</sup>, KS PHẠM VĂN CHU<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Trường Cao đẳng Đường sắt

<sup>2</sup>Công ty CP Đường sắt Hà Ninh

\*Email: tienman77@gmail.co

## TÓM TẮT

Đoạn chuyển tiếp giữa nền đất (nền đắp, nền đào) và công trình nhân tạo (mố cầu, cầu cạn, cửa hầm) là vị trí nhạy cảm nhất của tuyến đường sắt tốc độ cao (HSR) do biến thiên nhanh độ cứng, khác biệt cơ chế biến dạng theo thời gian và khuếch đại đáp ứng động lực học. Thực tiễn quốc tế cho thấy chi phí bảo trì và suy giảm hình học tuyến tập trung chủ yếu tại khu vực này nếu không được thiết kế "êm" theo phương dọc tuyến.

Bài báo đề xuất khung thiết kế theo tư duy hiệu năng gồm: (i) Rải đều độ cứng (stiffness ramp), (ii) khống chế lún tổng và lún không đều, (iii) kiểm soát nước, (iv) nghiệm thu định lượng bằng EV2 và quản lý vòng đời. Ví dụ tính toán đoạn chuyển tiếp với điều kiện địa chất khu vực gần cầu Lục Nam được sử dụng để minh họa cách lựa chọn phương án đạt yêu cầu HSR.

**Từ khóa:** Nền đường sắt; đoạn chuyển tiếp; lún nền đường sắt; lún từ biến; lún do tải trọng lặp.

## ABSTRACT

The transition zone between earthworks (embankment or cutting) and structures (bridge abutments, viaducts, tunnel portals) is the most sensitive location along a High-Speed Railway (HSR) line due to the abrupt variation in stiffness, differences in time-dependent deformation mechanisms and amplification of dynamic response. International practice indicates that maintenance costs and track geometry deterioration are largely concentrated in this area if it is not longitudinally designed with a smooth structural transition. This paper proposes a performance-based design framework comprising: (i) longitudinal stiffness ramping, (ii) control of total and differential settlement, (iii) drainage and water management, and (iv) quantitative acceptance through EV2 testing and life-cycle management. A design example for a transition section under geological conditions similar to those near Luc Nam Bridge is presented to illustrate the selection of a solution that satisfies HSR performance requirements.

**Keywords:** Railway subgrade; transition zone; railway subgrade settlement; creep settlement; settlement due to cyclic loading.

## 1. ĐẶC THÙ CƠ HỌC CỦA ĐOẠN CHUYỂN TIẾP TRONG HSR

Trong đường sắt tốc độ cao (HSR), nền đường là một phần của hệ đàn hồi tổng thể "tàu - ray - kết cấu đường - nền đất". Ở các đoạn tuyến thông thường, độ cứng và điều kiện biến dạng thay đổi dần theo phương dọc tuyến nền đáp ứng động lực học tương đối ổn định. Tuy nhiên, tại đoạn chuyển tiếp giữa nền đất và công trình nhân tạo như mố cầu hoặc cửa hầm, độ cứng nâng đỡ thay đổi đột ngột, làm cho đây trở thành vị trí nhạy cảm nhất của tuyến HSR [1, 2].

Về cơ học đất, nền đất có biến dạng phụ thuộc thời gian, gồm lún tức thời, lún cố kết và lún từ biến (đã trình bày ở các mục trước). Ngược lại, công trình bê tông gần như không lún. Sự khác biệt này

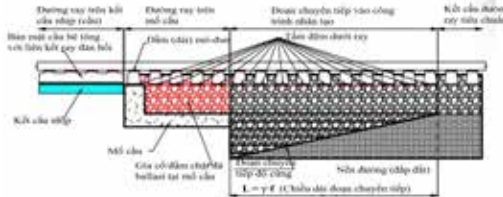
dẫn đến lún vi sai theo thời gian giữa hai phía chuyển tiếp. Nếu không rải đều độ cứng và khống chế lún theo hiệu năng, sai lệch hình học sẽ tích lũy trong khai thác [5].

Ngoài ra, khi đoàn tàu tốc độ cao đi qua vùng đổi cứng, sự phân xạ và tập trung sóng ứng suất làm tăng hệ số khuếch đại động tại vị trí tiếp giáp. Độ dốc lún càng lớn thì ứng suất động và biến dạng tích lũy do tải lặp càng tăng [1], [4]. Vì vậy, đoạn chuyển tiếp thường xuất hiện chuỗi cơ chế bất lợi: đổi cứng → lún vi sai → tăng tải động → tăng lún tích lũy.

Đặc thù cơ học của đoạn chuyển tiếp do đó không chỉ là bài toán ổn định hay lún tĩnh mà là bài toán tổng hợp giữa độ cứng,

biến dạng theo thời gian và đáp ứng động lực học. Thiết kế phải bảo đảm độ cứng biến thiên “êm” theo phương dọc tuyến, lún tổng và lún không đều nằm trong giới hạn khai thác, đồng thời kiểm soát điều kiện thủy văn để duy trì ổn định dài hạn (Hình 1).

Trong điều kiện địa chất Việt Nam với nhiều khu vực nền đất yếu, mực nước ngầm cao và biến động theo mùa, việc tiếp cận theo hiệu năng, lấy lún tổng và lún vi sai làm chỉ tiêu trung tâm là đặc biệt cần thiết đối với thiết kế nền đường HSR [2, 5].



Hình 1. Các biện pháp đề xuất để tăng cường ổn định đường sắt tại vùng nối giữa cầu và nền đường

**2. TIÊU CHÍ KỸ THUẬT CHO ĐOẠN CHUYỂN TIẾP HSR**

**2.1. Chiều dài chuyển tiếp và mô-đun EV2**

Một trong những nguyên tắc cốt lõi khi thiết kế đoạn chuyển tiếp trong đường sắt tốc độ cao là bảo đảm sự thay đổi độ cứng theo phương dọc tuyến diễn ra một cách “êm” và có kiểm soát. Thay vì để mô-đun nền thay đổi đột ngột giữa nền đất và công trình nhân tạo, cần bố trí một vùng chuyển tiếp với chiều dài đủ lớn để rải đều độ cứng, hạn chế tập trung ứng suất và giảm nguy cơ lún vi sai. Nguyên lý này thường được gọi là “ramp độ cứng” trong thực hành quốc tế [2, 6].

Nguyên lý thiết kế là “ramp độ cứng”:

$$L_{tr} \geq \frac{E_{V2,2} - E_{V2,1}}{\left(\frac{dE_{V2}}{dx}\right)_{max}} \quad (1)$$

Về mặt định lượng, chiều dài chuyển tiếp tối thiểu có thể xác định theo quan hệ biến thiên mô-đun dọc tuyến, như đã nêu trong công thức (1). Công thức này thể hiện yêu cầu khống chế độ dốc thay đổi của mô-đun EV2 theo phương dọc, nhằm tránh xuất hiện “bậc cứng” trong kết cấu nền-móng đường. Trong đó,  $E_{V1,1}$ ,  $E_{V2,2}$  là mô-đun biến dạng đại diện ở hai phía chuyển tiếp (nền đất và công trình hoặc nền thường và nền đã gia cố), còn  $(E_{V1,1}, E_{V2,2})_{max}$  là độ dốc biến thiên cho phép theo thiết kế.

Việc sử dụng EV2 làm chỉ tiêu kiểm soát độ cứng xuất phát từ yêu cầu nghiệm thu định lượng nền đường trong HSR, bảo đảm tính đồng đều và khả năng làm việc đàn hồi của lớp móng trên nền. Theo kinh nghiệm thiết kế và khai thác tại châu Âu và Nhật Bản, chiều dài chuyển tiếp đối với mô cấu thường nằm trong khoảng 20 - 30 m mỗi phía và mô-đun EV2 cần tăng dần về phía công trình, đạt giá trị không nhỏ hơn 150 - 200 MPa tại vị trí tiếp giáp [2, 6]. Các giá trị này không phải là con số cứng nhắc mà cần được hiệu chỉnh theo điều kiện địa chất, cấp tốc độ và loại kết cấu đường (ballast hoặc slab track).

Trong điều kiện Việt Nam, nơi nền đất có tính phân lớp phức tạp và độ bão hòa cao ở nhiều khu vực, việc xác định chiều dài chuyển tiếp không nên chỉ dựa vào kinh nghiệm mà cần kết hợp với phân tích lún và kiểm tra biến dạng theo hiệu năng. Như đã phân tích ở mục trước về đặc thù cơ học của đoạn chuyển tiếp, nếu độ dốc thay đổi mô-đun quá lớn sẽ làm tăng độ dốc lún, từ đó làm gia tăng hệ số khuếch đại động và biến dạng tích lũy theo thời gian. Do đó, thiết kế chiều dài chuyển tiếp theo nguyên lý “ramp độ cứng” cần được xem là bước đầu tiên để khống chế lún không đều và duy trì ổn định hình học lâu dài của tuyến HSR.

**2.2. Khống chế lún tổng**

Trong thực hành thiết kế nền đường sắt tốc độ cao, lún tổng của nền đường không phải là một đại lượng đơn nhất mà là kết quả tổng hợp của nhiều cơ chế biến dạng khác nhau, xảy ra ở các giai

đoạn khác nhau trong suốt vòng đời công trình. Việc phân tách rõ các thành phần lún không chỉ có ý nghĩa về mặt tính toán mà còn là cơ sở để lựa chọn giải pháp xử lý nền, kiểm soát hình học tuyến và đánh giá độ ổn định lâu dài của kết cấu đường.

Lún tổng theo vòng đời được biểu diễn:

$$S_{tot}(t, N) = S_i + S_c(t) + S_a(t) + S_d(N) \quad (2)$$

Theo cơ học đất cổ điển và nền-móng đường [3, 5], trong đó:  $S_i$  là lún tức thời;  $S_c$  là lún cố kết; (Terzaghi);  $S_a$  là lún từ biến;  $S_d$  là lún do tải trọng lặp.

**2.3. Khống chế lún không đều**

$$\Delta S = S(x_2) - S(x_1) \quad (3)$$

$$i = \frac{\Delta S}{L} \quad (4)$$

Theo yêu cầu khai thác HSR [1, 6]:

- Lún dư slab track  $\leq 15$  mm;
- Lún vi sai cục bộ  $\leq 5$  mm;
- Độ dốc lún  $i \leq 1/1000 \sim 1/1.500$ .

**3. CƠ SỞ TÍNH TOÁN CÁC THÀNH PHẦN LÚN**

**3.1. Lún tức thời**

Lún tức thời (ký hiệu ( $S_i$ )) là thành phần lún xuất hiện ngay khi nền đất chịu tác dụng của tải trọng, bao gồm tải trọng bản thân nền đắp, kết cấu đường và tải trọng đoàn tàu. Thành phần lún này chủ yếu do biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo tức thời của đất nền, xảy ra trong điều kiện chưa kịp thoát nước đối với đất dính hoặc gần như tức thời đối với đất rời.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta \sigma_j H_j}{E_j} \quad (5)$$

Trong đó:

- $\Delta \sigma_j$  là gia tăng ứng suất thẳng đứng trung bình trong lớp đất thứ  $j$ ;
- $H_j$  là chiều dày lớp đất thứ  $j$ ;
- $E_j$  là mô-đun biến dạng đàn hồi của lớp đất thứ  $j$ ;
- $I_j$  là hệ số ảnh hưởng, xét đến điều kiện phân bố ứng suất, hình dạng tải và điều kiện biên.

**3.2. Lún cố kết**

Lún cố kết dài hạn là thành phần lún phát triển theo thời gian do quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng dư trong đất dính bão hòa dưới tác dụng của tải trọng lâu dài từ nền đắp và kết cấu đường. Khác với lún tức thời xảy ra gần như đồng thời với việc đặt tải, lún cố kết diễn ra chậm, có thể kéo dài trong nhiều năm, thậm chí hàng chục năm, tùy thuộc vào điều kiện địa chất, chiều dày lớp đất yếu, hệ số thấm và sơ đồ thoát nước của nền.

Đối với một lớp đất dính có chiều dày  $H$ , lún cố kết cuối cùng  $S_{c,a}$  có thể được xác định theo biểu thức:

$$S_{c,a} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left( \frac{\sigma'_1 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (6)$$

Trong đó:

- $C_c$  là chỉ số nén của đất;
- $e_0$  là hệ số rỗng ban đầu;
- $\sigma'_0$  là ứng suất hữu hiệu ban đầu tại tâm lớp đất;
- $\Delta \sigma'$  là gia tăng ứng suất hữu hiệu do tải trọng nền đắp và kết cấu đường.

**3.3. Lún từ biến**

Sau khi quá trình lún tức thời và lún cố kết sơ cấp cơ bản đã hoàn thành, nền đất vẫn có thể tiếp tục biến dạng theo thời gian dưới tác dụng của tải trọng không đổi. Thành phần biến dạng này được gọi là lún từ biến (hay lún thứ cấp), ký hiệu là  $S_o(t)$ . Đây là dạng lún không gắn trực tiếp với quá trình thoát nước, mà chủ yếu liên quan đến đặc tính vật liệu và cấu trúc của đất.

Về bản chất, lún từ biến phát sinh do sự tái sắp xếp chậm của khung hạt đất, sự trượt nhớt giữa các hạt và sự suy giảm dần các liên kết cấu trúc trong đất dưới tác dụng của ứng suất hữu hiệu gần như không đổi. Hiện tượng này đặc biệt rõ rệt đối với đất sét mềm, đất yếu có chỉ số dẻo lớn, đất hữu cơ hoặc đất có cấu trúc, là những loại đất thường gặp trong nền đường sắt tại Việt Nam.

Đối với đất sét và các loại đất yếu có cấu trúc nhạy cảm với thời gian, lún từ biến thường được mô tả bằng quan hệ logarit với thời gian, trên cơ sở các thí nghiệm cố kết dài hạn trong phòng. Dạng biểu diễn phổ biến của lún từ biến cho một lớp đất  $i$  có thể viết như sau:

$$S_{\alpha,i}(t) = C_{\alpha,i} H_i \log\left(\frac{t}{t_{pi}}\right) \quad (7)$$

Trong đó:

- $S_{\alpha,i}(t)$  là độ lún từ biến lớp đất  $i$  tích lũy tại thời điểm  $t$ ;
- $C_{\alpha,i}$  là chỉ số từ biến của lớp đất thứ  $i$ , phản ánh mức độ biến dạng nhất của đất;
- $H_i$  là chiều dày lớp đất  $i$  chịu lún từ biến;
- $t_{pi}$  là thời điểm bắt đầu xét lún từ biến (thường lấy khi kết thúc cố kết sơ cấp);
- $t$  là thời gian xét lún.

### 3.4. Lún do tải trọng lặp

Trong quá trình khai thác đường sắt tốc độ cao, nền đường không chỉ chịu tải trọng tĩnh do trọng lượng bản thân kết cấu và đoàn tàu, mà còn chịu tải trọng lặp với tần suất rất lớn do các đoàn tàu liên tục chạy qua ở vận tốc cao. Dưới tác dụng của tải trọng lặp này, nền đất và các lớp vật liệu nền có thể phát sinh biến dạng dư tích lũy, dẫn đến một dạng lún riêng biệt gọi là lún do tải trọng lặp, ký hiệu  $S_d(N,t)$ .

Trong thực hành thiết kế, lún do tải trọng lặp thường được mô tả bằng các quan hệ thực nghiệm theo số chu kỳ tải. Một dạng biểu thức đơn giản và thường được sử dụng là:

$$S_d(N) = a \cdot N^b \quad (8)$$

hoặc ở dạng logarit:

$$S_d(N) = A \cdot \log(N) + B \quad (9)$$

Trong đó:

- $S_d(N)$  là độ lún dư tích lũy sau N chu kỳ tải;
- $N$  là số chu kỳ tải trọng lặp;
- $a, b, A, B$  là các hệ số thực nghiệm, phụ thuộc vào loại đất, trạng thái ứng suất và điều kiện nền.

## 4. NHÓM GIẢI PHÁP THIẾT KẾ

Trên cơ sở các đặc thù cơ học đã phân tích ở các mục trước, đặc biệt là yêu cầu rải đều độ cứng, khống chế lún tổng và lún không đều, giải pháp thiết kế đoạn chuyển tiếp trong HSR không thể dựa vào một biện pháp đơn lẻ mà cần tổ hợp nhiều giải pháp theo nguyên tắc “đồng bộ độ cứng - ổn định dài hạn - kiểm soát vòng đời”. Các giải pháp dưới đây cần được lựa chọn và kết hợp tùy theo điều kiện địa chất, cấp tốc độ và loại kết cấu đường (ballast hoặc slab track).

### 4.1. Lớp chuyển tiếp

Lớp chuyển tiếp bằng vật liệu hạt chọn lọc được bố trí giữa nền đất và công trình nhân tạo nhằm tạo vùng đệm cơ học, giúp mô-đun biến dạng tăng dần về phía công trình. Chiều dày lớp này thường trong khoảng 0,5 - 1,0 m, tùy theo điều kiện nền và yêu cầu khai thác. Nguyên lý làm việc của lớp chuyển tiếp là cải thiện phân bố ứng suất và giảm độ dốc thay đổi mô-đun dọc tuyến, phù hợp với yêu cầu “ramp độ cứng” đã nêu tại Mục 2.1 và thực hành thiết kế HSR quốc tế [2, 6].

### 4.2. Gia cố nền

Khi nền tự nhiên có sức chịu tải và mô-đun thấp, cần áp dụng các biện pháp gia cố như cọc xi măng-đất, cọc bê tông, cọc cát hoặc gia tải trước. Mục tiêu là nâng cao mô-đun nền và giảm lún lâu dài. Nguyên tắc thiết kế là mô-đun  $E_{v2}$  sau gia cố không được thấp hơn mô-đun của nền thường liền kề, tức:

$$E_{v2,sau\ gia\ cố} \geq E_{v2,nền\ thường} \quad (10)$$

Nguyên lý chia tải giữa cọc và đất nền, cũng như cơ sở lựa chọn giải pháp cải thiện nền đã được trình bày trong phần “Gia cố nền bằng cọc” và tài liệu về xử lý nền đất yếu [3]. Trong thiết kế HSR, cần đặc biệt lưu ý xử lý mềm tại ranh giới kết cấu gia cố để tránh hình thành “bậc độ cứng”.

### 4.3. Gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật (geogrid)

Việc bố trí một hoặc hai lớp geogrid trong lớp móng trên nền

có tác dụng tăng khả năng phân bố tải, hạn chế biến dạng cắt và giảm lún tích lũy do tải trọng lặp. Cơ chế làm việc của geogrid dựa trên tương tác ma sát và khóa chặt cơ học giữa vật liệu hạt và lưới, qua đó cải thiện độ cứng tương đương của lớp nền-móng [5]. Giải pháp này đặc biệt hiệu quả trong các đoạn chuyển tiếp ngắn hoặc kết hợp với gia cố cọc.

### 4.4. Bản chuyển tiếp

Đối với kết cấu không đá ballast (slab track), bản chuyển tiếp thường được bố trí giữa cầu và nền đất nhằm giảm độ dốc lún và hạn chế khuếch đại động tại vị trí tiếp giáp. Theo các nghiên cứu về chuyển tiếp cầu-nền trong HSR [1, 4], bản chuyển tiếp có tác dụng làm “mềm hóa” sự thay đổi độ cứng, qua đó giảm ứng suất động và cải thiện điều kiện hình học khai thác.

### 4.5. Kiểm soát nước

Điều kiện thủy văn có ảnh hưởng trực tiếp đến độ cứng và lún lâu dài của nền. Nước ngầm cao hoặc thoát nước kém có thể làm suy giảm ứng suất hữu hiệu, kích hoạt lún nhanh và tăng biến dạng tích lũy. Do đó, thiết kế đoạn chuyển tiếp phải đồng thời bố trí hệ thống thoát nước mặt và thoát nước ngầm hợp lý, bảo đảm duy trì ổn định lâu dài của mô-đun nền.

### 4.6. Quan trắc và quản lý vòng đời

Trong HSR, thiết kế không kết thúc ở giai đoạn thi công mà phải gắn với quản lý vòng đời. Theo kinh nghiệm quản lý nền-móng đường [5, 6], cần thiết lập hệ thống quan trắc lún và biến dạng tại đoạn chuyển tiếp. Khi tốc độ lún vượt ngưỡng kiểm soát, ví dụ:  $\frac{ds}{dt} > 0,5$  mm/năm thì phải thực hiện kiểm tra, đánh giá lại điều kiện khai thác và đề xuất biện pháp can thiệp. Việc theo dõi tốc độ lún theo thời gian giúp phát hiện sớm xu hướng bất lợi, đặc biệt trong các tuyến slab track có yêu cầu hình học nghiêm ngặt.

## 5. VÍ DỤ TÍNH TOÁN THIẾT KẾ KHÔNG CHẾ LÚN TỔNG VÀ LÚN KHÔNG ĐỀU CHO ĐOẠN CHUYỂN TIẾP CÓ ĐIỀU KIỆN ĐỊA CHẤT GIỐNG ĐOẠN CẦU LỤC NAM

### 5.1. Số liệu đầu vào

- Phạm vi:  $L = 30$  m, chia 3 đoạn.
- Điều kiện nền đại diện:  $E_s = 20.000$  kPa;  $h_s = 10$  m.
- Ba phương án so sánh: PA1 - đá cấp phối; PA2 - đá + geogrid; PA3 - cọc + geogrid.
- Giả thiết tải trọng quy đổi xuống mặt nền sau khi phân bố qua kết cấu trên:  $\Delta\sigma = 70$  kPa.

Mục tiêu kiểm soát đối với tuyến sử dụng slab track theo thực hành HSR quốc tế [1, 6]:

- Lún dư sau thi công  $\leq 15$  mm;
- Lún vi sai cục bộ  $\leq 5$  mm;
- Độ dốc lún  $i \leq 1/1.000 \sim 1/1.500$ .

### 5.2. Tính lún tổng theo vòng đời (chưa xử lý)

Theo công thức (2):

$$S_{\text{tot}}(t, N) = S_i + S_c(t) + S_{\alpha}(t) + S_d(N)$$

Trong ví dụ minh họa này, để so sánh phương án về mặt cơ học cơ bản, giả thiết:

#### 5.2.1. Lún tức thời

Theo công thức (5), giả sử nền tương đối đồng nhất:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\sigma_j H_j}{E_j} = \frac{\Delta\sigma H}{E_s} = \frac{70 \cdot 10}{20.000} = 0,035 \text{ m} = 35 \text{ mm}$$

Giá trị này vượt xa giới hạn cho phép đối với HSR theo [1, 6].

#### 5.2.2. Lún cố kết $S_c$

Giả thiết đại diện đất sét mềm vùng Bắc Giang  $c_c = 0,25$ ;  $e_0 = 1,0$ , ứng suất hữu hiệu ban đầu tại giữa lớp  $\sigma'_0 = 100$  kPa theo lý thuyết Terzaghi và công thức (6):

$$S_{c,\infty} = \frac{c_c}{1+e_0} H \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) = \frac{0,25}{1+1} \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{100+70}{100}\right) = 0,2875 \text{ m} = 288 \text{ mm}$$

#### 5.2.3. Lún từ biến $S_{\alpha}$

Với giả thiết  $C_\alpha = 0,015$ ,  $t_p = 1$  năm;  $t = 30$  năm, theo công thức (7) có thể viết thành:

$$S_{\alpha,t}(t) = C_{\alpha} \cdot H \cdot \log\left(\frac{t}{t_p}\right) = 0,015 \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{30}{1}\right) = 0,0222 \text{ m} \approx 222 \text{ mm}.$$

#### 5.2.4. Lún do tải trọng lặp $S_d$

Giả thiết tuyến HSR khai thác 30 năm:  $N \approx 10^8$  chu kỳ tải; với hệ số thực nghiệm đại diện đất yếu:  $A=1$  mm,  $B = 2,0$  mm:

$$S_d = 2 + 1,0 \cdot \log(10^8) = 2 + 8 = 10 \text{ mm}$$

Giá trị này phù hợp nghiên cứu thực nghiệm về tích lũy biến dạng nền dưới tải lặp [4, 6].

#### 5.2.5. Tổng hợp lún vòng đời (không xử lý)

$$S_{tot} = 35 + 288 + 222 + 10 = 455 \text{ mm}$$

Giá trị này lớn hơn nhiều so với giới hạn cho phép HSR. Kết luận là nếu không xử lý nền, đoạn chuyển tiếp sẽ phát sinh lún lớn và lún vi sai nguy hiểm.

### 5.3. Tính lún sau xử lý theo phương án geogrid

#### 5.3.1. Giả thiết kỹ thuật cho PA3 (cọc + geogrid)

Áp dụng nguyên lý chia tải cọc-đất [3]:

$$\Delta\sigma_s = (1 - \eta)\Delta\sigma$$

Trong đó:  $\eta$  là hệ số chia tải cho cọc;  $\Delta\sigma_s$  là ứng suất truyền xuống đất giữa cọc.

Với đoạn chuyển tiếp  $L = 30$  m, chia 3 đoạn 10 m, lựa chọn  $\eta$  giảm dần theo đúng tinh thần “ramp độ cứng”: Đoạn 0-10 m:  $\eta_1 = 0,085$ ; đoạn 10-20 m:  $\eta_2 = 0,75$ ; đoạn 20 - 30 m:  $\eta_3 = 0,60$ .

#### 5.3.2. Tính lún tức thời sau xử lý $S_i$

Theo công thức (5), với mỗi đoạn  $k$ :

$$S_{i,k} = \frac{\Delta\sigma_{s,k} H}{E_s}$$

- Đoạn 0 - 10 m:

$$\Delta\sigma_{s,1} = (1 - \eta_1) \cdot \Delta\sigma = (1 - 0,085) \cdot 70 = 10,5 \text{ kPa}$$

$$S_{i,1} = \frac{10,5 \cdot 10}{20000} = 0,00525 \text{ m} = 5,3 \text{ mm}$$

- Tương tự, đoạn 10-20 m:  $\Delta\sigma_{s,2} = 17,5$  kPa;  $S_{i,2} = 8,8$  mm.

- Tương tự, đoạn 20-30 m:  $\Delta\sigma_{s,3} = 28,0$  kPa;  $S_{i,3} = 14,0$  mm.

#### 5.3.3. Lún cố kết sau xử lý $S_c$

Theo công thức (6), thay  $\Delta\sigma$  bằng  $\Delta\sigma_{s,k}$  [3]:

$$S_{c,k} = \frac{C_c}{1 + e_0} H \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_{s,k}}{\sigma'_0}\right)$$

Với  $C_c = 0,25$ ;  $e_0 = 1,0$ ;  $H = 10$  m;  $\sigma'_0 = 100$  kPa;

Đoạn 0-10 m:

Đoạn 0-10 m:

$$S_{c,1} = \frac{0,25}{1+1,0} \cdot 10 \log\left(\frac{100+10,5}{100}\right) = 53,8 \text{ mm}$$

- Tương tự, đoạn 10-20 m:  $S_{c,2} = 87,5$  mm.

- Tương tự, đoạn 20-30 m:  $S_{c,3} = 133,8$  mm.

#### 5.3.4. Lún từ biến sau xử lý $S_a$

Theo công thức (7) [5], giả thiết lún từ biến tỷ lệ với mức ứng suất tác dụng. Một cách viết gọn khác dùng trong tính toán là:

$$S_{\alpha,k}(t) = \lambda_\alpha \cdot S_{c,k} \cdot \log\left(\frac{t}{t_p}\right)$$

Trong đó:  $\lambda_\alpha$  là tỷ lệ giữa lún từ biến và lún cố kết (thực tế phụ thuộc đất; dùng để minh họa). Chọn  $\lambda_\alpha = 0,3$  (đất sét mềm, mức vừa) [5]. Với  $t=30$  năm;  $t_p=1$  năm:

$$S_{\alpha,k} = 0,443 \cdot S_{c,k}$$

Thay số ta có: Đoạn 0-10 m:  $S_{\alpha,1} = 23,8$  mm; đoạn 10-20 m:  $S_{\alpha,2} = 33,8$  mm; đoạn 20-30 m:  $S_{\alpha,3} = 59,3$  mm.

#### 5.3.5. Lún do tải trọng lặp sau xử lý $S_d$

Theo quan hệ thực nghiệm dạng logarit (9). Để phản ánh hiệu quả của cọc + geogrid làm giảm biến dạng tích lũy, giả thiết B giảm theo mức chia tải (giảm ứng suất động trong đất) [4], [6]. Chọn: Đoạn 0-10 m:  $B_1=0,3$  mm; đoạn 10-20 m:  $B_2=0,5$  mm; đoạn 20-30 m:  $B_3=0,8$  mm;  $A=1$  mm.

Thay số ta có  $S_{d,1} = 3,4$  mm;  $S_{d,2} = 5,0$  mm;  $S_{d,3} = 7,4$  mm.

### 5.4. Tổng hợp lún vòng đời sau xử lý và kiểm tra “mức đạt” HSR

Tổng lún từng đoạn:

- Đoạn 0-10 m:  $S_{tot,1} = 86,3$  mm.

- Đoạn 10-20 m:  $S_{tot,2} = 140,1$  mm.

- Đoạn 20-30 m:  $S_{tot,3} = 214,5$  mm.

Nếu chỉ “lấp cọc” mà không có biện pháp gia tải trước/đợt cố kết, lún vòng đời vẫn rất lớn do  $S_c$ ,  $S_a$  còn chiếm ưu thế. Điều này phản ánh đúng thực tế: Cọc chia tải làm giảm lún, nhưng không triệt tiêu hoàn toàn cố kết và từ biến nếu vẫn còn tải đáng kể truyền vào đất.

Để đạt tiêu chí “lún dư sau thi công  $\leq 15$  mm” của slab track [1, 6], bắt buộc phải đưa vào quy trình xử lý theo hiệu năng gồm: Gia tải trước và/hoặc tăng thoát nước để “lấy” phần lớn  $S_c$  trước khi lấp tầng bản; Kiểm soát chặt mực nước và chất lượng đầm chặt lớp chuyển tiếp; vượt mềm cuối vùng xử lý (tăng dần  $E_{v,2}$ , giảm dần  $\eta$ ) để khống chế lún không đều.

Khi áp dụng đúng quy trình thi công-chờ lún, tiêu chí kiểm soát nên chuyển từ “lún tổng vòng đời” sang “lún dư sau thi công”:

$$S_r = S_{tot} - S_{pre}$$

Trong đó:  $S_{pre}$  là lún đã được gây ra và ổn định trong giai đoạn gia tải/thi công. Với HSR, mục tiêu là làm cho  $S_{pre}$  ( $\approx$  mm) trước khi đưa vào khai thác [6].

Kiểm soát lún không đều: Do  $S_{tot}$  biến thiên mạnh theo đoạn, nếu đoạn chuyển tiếp không đủ dài sẽ xuất hiện “điểm gãy” lún ở ranh giới kết thúc xử lý. Do đó, giải pháp thiết kế đoạn chuyển tiếp chỉ đạt yêu cầu HSR khi: Có “taper”  $\eta$  là giải pháp giảm dần mức chia tải của hệ cọc theo phương dọc tuyến nhằm rải đều độ cứng, làm êm độ dốc lún và hạn chế khuếch đại động tại ranh giới kết thúc xử lý; vùng taper thường kéo dài thêm 10 - 20 m ngoài chiều dài xử lý chính để tránh hình thành bậc độ cứng cũng như kết hợp lớp chuyển tiếp và geogrid để làm êm độ dốc lún [4, 6].

## 6. KẾT LUẬN

- Đoạn chuyển tiếp giữa nền đất và công trình nhân tạo trong đường sắt tốc độ cao là vị trí nhạy cảm nhất của tuyến do tồn tại sự biến thiên đột ngột về độ cứng, khác biệt cơ học biến dạng theo thời gian và khuếch đại đáp ứng động lực học. Nếu không được thiết kế theo tư duy “ramp độ cứng” và kiểm soát lún theo hiệu năng, khu vực này sẽ tập trung lún vi sai và gia tăng tải trọng động, dẫn đến suy giảm nhanh hình học tuyến và tăng chi phí bảo trì.

- Kết quả ví dụ tính toán với điều kiện địa chất tương tự đoạn cầu Lục Nam cho thấy: Nếu không xử lý nền, lún vòng đời có thể đạt hàng trăm milimet, vượt xa giới hạn khai thác HSR. Giải pháp gia cố bằng cọc kết hợp lớp chuyển tiếp và geogrid giúp giảm đáng kể ứng suất truyền xuống đất yếu. Tuy nhiên, để đạt tiêu chí lún dư  $\leq 15$  mm đối với slab track, bắt buộc phải kết hợp gia tải trước, kiểm soát thoát nước và thiết kế “taper” mức gia cố nhằm làm êm độ dốc lún và hạn chế “bậc độ cứng”.

- Thiết kế đoạn chuyển tiếp HSR trong điều kiện địa chất Việt Nam cần được tiếp cận theo tư duy hiệu năng và vòng đời, trong đó lún tổng, lún không đều, độ dốc lún và sự đồng đều độ cứng là các chỉ tiêu trung tâm. Việc tích hợp giải pháp kết cấu, kiểm soát thi công và quan trắc khai thác là điều kiện tiên quyết để bảo đảm ổn định hình học lâu dài và khai thác bền vững tuyến đường sắt tốc độ cao.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Esveld, C. Modern Railway Track, 2001.
- [2] Kützner, C. High-Speed Railway Infrastructure, 2019.
- [3] Moseley, M.P., Kirsch, K. Ground Improvement, 2004.
- [4] Paixão, A., Fortunato, E., Calçada, R. Bridge-Embankment Transition Zones in High-Speed Railways, 2014.
- [5] Selig, E.T., Waters, J.M. Track Geotechnology and Substructure Management, 1994.
- [6] UIC IRS 70722 - Ballastless Track and Substructure Maintenance and Improvement, 2023.